

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

О. К. Колесницький, В. П. Кожем'яко

**ПРИСТРОЇ ПОРІВНЯННЯ ЗОБРАЖЕНЬ
НА БІСПН-ПРИЛАДАХ ДЛЯ
ОПТОЕЛЕКТРОННИХ ПАРАЛЕЛЬНИХ
ПРОЦЕСОРІВ ТА НЕЙРОКОМП'ЮТЕРІВ**

Монографія

**Вінниця
ВНТУ
2010**

УДК 004.031
ББК 32.973-04
К 24

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 7 від 25 лютого 2010 р.)

Рецензенти:

О. В. Осінський, доктор технічних наук, професор

А. М. Петух, доктор технічних наук, професор

Колесницький, О. К.

К 24 Пристрої порівняння зображень на біспін-приладах для оптоелектронних паралельних процесорів та нейрокомп'ютерів : монографія / О. К. Колесницький, В. П. Кожем'яко. — Вінниця : ВНТУ, 2010. — 124 с.

ISBN 978-966-641-379-9

В монографії висвітлюються принципи технічної реалізації, математичні моделі і результати експериментальних досліджень пристроїв порівняння зображень на біспін-приладах, які відрізняються підвищеною ефективністю (більшою точністю і чутливістю, меншими апаратними витратами і споживаною потужністю, а при реалізації на арсеніді галія - ще і підвищеною швидкістю). Результати роботи можна використовувати для побудови функціональних вузлів паралельних оптоелектронних аналогових і цифрових процесорів, а також нейрокомп'ютерів.

УДК 004.031
ББК 32.973-04

ISBN 978-966-641-379-9

© О. Колесницький, В. Кожем'яко, 2010

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП	6
1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СФЕР ЗАСТОСУВАННЯ ОПЕРАЦІЇ ПОРІВНЯННЯ ЗОБРАЖЕНЬ І ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ЇЇ РЕАЛІЗАЦІЇ.....	8
1.1 Види оптоелектронних пристроїв для паралельного порівняння зображень і їх основні параметри.....	8
1.2 Галузі обчислювальної техніки, де необхідні пристрої порівняння зображень	11
1.2.1 Пристрої порівняння зображень в паралельних оптоелектронних аналогових і цифрових процесорах	11
1.2.2 Пристрої порівняння зображень в кореляційних системах розпізнавання образів.....	14
1.2.3 Пристрої для порівняння зображень в оптоелектронних реалізаціях штучних нейронних мереж	18
1.3 Порівняльний аналіз відомих методів і пристроїв для порівняння зображень	28
ВИСНОВКИ.....	36
2. МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ ПОРІВНЯННЯ ЗОБРАЖЕНЬ НА ОСНОВІ БІСПІН-ПРИЛАДІВ.....	37
2.1 Математична модель комірки матриці для порівняння- віднімання зображень на основі біспін-приладів	37
2.2 Математична модель комірки компаратора зображень на основі біспін-приладів.....	51
2.3 Обґрунтування можливості використання міри схожості векторів, що обчислюється пристроєм порівняння-віднімання зображень, в нейронній мережі Кохонена	56
ВИСНОВКИ.....	60
3. ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРИСТРОЇВ ПОРІВНЯННЯ ЗОБРАЖЕНЬ І СИСТЕМ НА ЇХ ОСНОВІ.....	61
3.1 Основні параметри і режими роботи біспін-приладу	61

3.2 Пристрій порівняння-віднімання зображень на фотодіодах і біспін-приладі.....	68
3.2.1 Технічна реалізація і функціонування пристрою порівняння-віднімання зображень при використанні біспін-приладу у вентиляльному режимі	68
3.2.2 Технічна реалізація і функціонування пристрою порівняння-віднімання зображень при використанні біспін-приладу у фотодіодному режимі	71
3.3 Компаратор зображень на біспін-приладах	73
3.4 Технологічні аспекти реалізації пристроїв порівняння зображень на біспін-приладах	76
3.5 Критерій ефективності пристроїв порівняння зображень	82
3.6 Принципи використання пристроїв порівняння зображень в системах розпізнавання образів	88
ВИСНОВКИ.....	96
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИСТРОЇВ ПОРІВНЯННЯ ЗОБРАЖЕНЬ НА БІСПІН-ПРИЛАДАХ	97
4.1 Експериментальні дослідження комірки пристрою порівняння-віднімання зображень на біспін-приладі	97
4.2 Експериментальні дослідження комірки компаратора зображень на біспін-приладах	102
4.3 Порівняння ефективності відомих і запропонованих пристроїв порівняння зображень	106
4.4 Оцінка адекватності математичних моделей пристроїв порівняння зображень на біспін-приладах.....	110
ВИСНОВКИ.....	112
ПІСЛЯМОВА.....	113
ЛІТЕРАТУРА	115

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

SEED – self electro-optic effect device
VLSI – very large scale integration (circuits)
АРТ – адаптивна резонансна теорія
БД КТ – блок D-тригерів картинного типу
БФБО – багатофункціональний блок обробки
ЕКТ – електрично керований транспарант
ЕНГ – елементи на надгратках
ЗЗ – зворотній зв'язок
ІЧ – інфрачервоний
К-МОН – комплементарний металл-оксид-напівпровідник
КОЦК – комутатор оптичних цифрових картин
НВІС – надвеликі інтегральні схеми
НМ – нейронна мережа
ОБЕ – оптичні бістабільні елементи
ОЗП – оперативний пристрій, що запам'ятовує
ОКТ – оптично керований транспарант
ОП – операційний підсилювач
ОПЗ – область просторового заряду
ОСОЗ – обчислювальні системи обробки зображень
ПВВ – пристрій введення
Пвив – пристрій виведення
ПДОС – просторово-дискретні оптоелектронні структури
ПЗП – постійний пристрій, що запам'ятовує
ПНОЕС – просторово-неперервні оптоелектронні структури
ПЧМС – просторово-часовий модулятор світла
РОЦК – розгалужувач оптичних цифрових картин
СВФТ – світловипромінюючі фототиристиори
ФВК – функції взаємної кореляції
ФП-ЕОК – фотоприймач-електрооптичний кристал
ФП-РК – фотоприймач-рідкий кристал
ЦОЕП – цифрові оптоелектронні процесори

ВСТУП

В сучасних умовах досить актуальним є завдання створення високопродуктивних інформаційно-обчислювальних систем, що володіють інтелектуальними функціями і здатні вирішувати когнітивні задачі. При цьому найчастіше відходять від фон-Неймановського принципу побудови оброблювальних засобів і використовують багатопроцесорні системи і нейроподібні середовища.

Окрім інтенсивних досліджень в області створення нових структур і архітектур високопродуктивних інформаційно-обчислювальних систем і нейрокомп'ютерів, не менш інтенсивно і у взаємному зв'язку проводяться дослідження зі створення нового виду елементної бази. Особливо популярними є оптоелектронна і наноелектронна елементні бази.

Нейромережеві методи і нейрокомп'ютери є незамінними при вирішенні завдань розпізнавання образів різної природи (зображення, звуки, мова, запахи і ін.), прийняття рішень, управління складними технологічними процесами та ін. Нейрокомп'ютери пропонують відносно просту технологію «породження» алгоритмів шляхом навчання. У цьому їх основна перевага і призначення в комп'ютерному світі. Можливість «породжувати» алгоритми виявляється особливо корисною для задач розпізнавання образів, в яких часто не вдається виділити значущі ознаки апіорі. От чому нейрокомп'ютерні системи і технології є актуальними саме зараз, в період розквіту мультимедіа, коли розвиток глобальної мережі Internet вимагає розробки нових технологій, тісно пов'язаних з розпізнаванням образів.

В наш час пріоритетним і дуже актуальним напрямом розвитку обчислювальної техніки є створення високопродуктивних інформаційно-обчислювальних інтелектуальних систем. Тому досить інтенсивно розвиваються такі напрямки як паралельні процесори і нейрокомп'ютери. При практичній реалізації паралельних процесорів і нейрокомп'ютерів в якості елементної бази найчастіше обирають оптоелектронну або наноелектронну. Одним з основних функціональних вузлів паралельних оптоелектронних процесорів і багатьох типів нейрокомп'ютерів є пристрій для порівняння зображень. На його ос-

нові реалізуються такі функції і операції: аналого-цифрове і цифро-аналогове перетворення зображень, кореляційна обробка зображень, порівняння і сортування масивів чисел. Крім того, пристрій для порівняння зображень необхідний при реалізації таких типів нейронних мереж як мережа Кохонена, мережа зустрічного поширення, ART-мережа та ін.

Все вищевикладене свідчить про те, що дослідження зі створення високоефективних пристроїв порівняння зображень є вельми актуальними. Ця робота виконувалася відповідно до плану наукових досліджень Вінницького національного технічного університету і Міністерства освіти і науки України за держбюджетною темою 57-Д-249 «Образний відеокомп'ютер» (№ держ. реєстрації 0102U002261) та відображена в наукових публікаціях [1-10].

Мета дослідження – підвищення ефективності пристроїв порівняння зображень за рахунок їх реалізації із застосуванням нового оптоелектронного приладу – біспіну.

В монографії подано розв'язання таких **задач**:

1. Проведено класифікацію, системний аналіз сфер застосування і аналітичний огляд відомих пристроїв порівняння зображень з метою виявлення їх недоліків і обґрунтування напрямків їх вдосконалення.
2. Розроблено схемотехнічні рішення побудови і математичну модель пристрою порівняння-віднімання зображень на основі біспін-приладу.
3. Розроблено схемотехнічні рішення побудови і математичну модель компаратора зображень на основі біспін-приладів.
4. Досліджено принципи технічної реалізації пристроїв порівняння зображень на основі біспін-приладів.
5. Розроблено критерій ефективності пристроїв порівняння зображень і на його основі проведено порівняння ефективності запропонованих і відомих пристроїв порівняння зображень.
6. Проведено експериментальні дослідження пристроїв порівняння зображень на основі біспін-приладів з метою визначення їх технічних параметрів і оцінки адекватності розроблених математичних моделей.

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СФЕР ЗАСТОСУВАННЯ ОПЕРАЦІЇ ПОРІВНЯННЯ ЗОБРАЖЕНЬ І ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ЇЇ РЕАЛІЗАЦІЇ

Величезний інтерес до використання оптичних і оптоелектронних методів в нових інформаційних технологіях зумовлений винятковими властивостями оптичного випромінювання, що забезпечують паралелізм, а також просторовість обробки і перетворення, високу продуктивність і завадостійкість. Останнім часом інтенсивно досліджуються оптичні методи і засоби паралельної цифрової і аналогової обробки зображень [11-27], які володіють функціональною гнучкістю і високою точністю. Практична реалізація всіх можливостей оптичних методів вимагає комплексних досліджень, що включають створення нових принципів і алгоритмів обробки і перетворення сигналів, вирішення системних і архітектурних питань, розробку елементної бази на нових фізичних принципах. Певних успіхів досягнуто в області створення двовимірних логічних, запам'ятовуючих та комутуючих пристроїв для паралельних оптоелектронних процесорів, продуктивність яких може досягати величини $10^{10} \dots 10^{12}$ оп/с. Одними з основних функціональних вузлів оптоелектронних процесорів і нейрокомп'ютерів є пристрої для порівняння зображень. Вони необхідні при реалізації таких систем як оптоелектронні лінійно-алгебраїчні процесори [13-17], процесори паралельного сортування масивів чисел [18-20], АЦП зображень [21-24], корелятори зображень [25-27], нейрокомп'ютери [28-38].

1.1 Види оптоелектронних пристроїв для паралельного порівняння зображень і їх основні параметри

Оптоелектронні пристрої для паралельного порівняння зображень, як вже наголошувалося, виконують функцію порівняння зображень без застосування процесу сканування і тому мають два паралельних оптичних входи, на які подаються порівнювані зображення А і В (рис. 1.1), і оптичний вихід, на якому формується вихідне зображення

С (результат порівняння). Завдяки відсутності процесу сканування порівняння зображень виконується за один такт, тобто час порівняння не залежить від розмірності зображення, а залежить тільки від швидкодії обраної оптоелектронної елементної бази. Залежно від виду вихідного зображення пристрої для паралельного порівняння зображень можна розділити на 3 види:

- 1) компаратори зображень;
- 2) пристрої для порівняння-віднімання зображень;
- 3) пристрої для визначення ступеня збігу зображень.

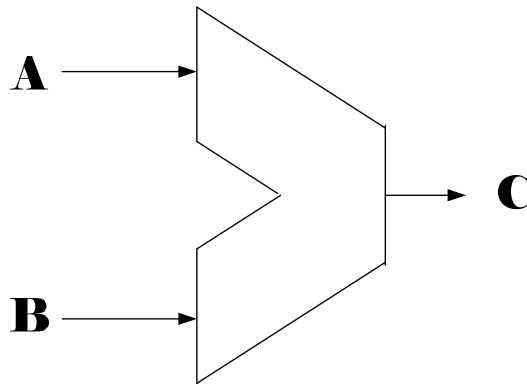


Рис. 1.1. Умовне зображення пристрою для паралельного порівняння зображень

Компаратори зображень по аналогії з електронними компараторами зображень є аналого-цифровими пристроями, тобто видають на виході цифровий сигнал – бінарне зображення, яке пов’язане з вхідними аналоговими сигналами (напівтоновими зображеннями) нелінійною залежністю:

$$c_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ якщо } a_{ij} \geq b_{ij}; \\ 0, \text{ якщо } a_{ij} < b_{ij}, \end{cases} \quad (1.1)$$

де $\mathbf{A}=\{a_{ij}\}$ – перше вхідне напівтонове (багатоградаційне) зображення; $\mathbf{B}=\{b_{ij}\}$ – друге вхідне напівтонове зображення; $\mathbf{C}=\{c_{ij}\}$ – вихідне бінарне зображення.

Пристрої порівняння-віднімання зображень відрізняються від компараторів тим, що виконують аналогову нелінійну операцію «обмежена різниця», яка описується виразом

$$c_{ij} = \begin{cases} a_{ij} - b_{ij}, & \text{якщо } a_{ij} \geq b_{ij}; \\ 0, & \text{якщо } a_{ij} < b_{ij}. \end{cases} \quad (1.2)$$

Таким чином, пристрої порівняння-віднімання зображень функціонально гнучкіші, ніж компаратори зображень, оскільки дозволяють не тільки порівняти два зображення, але і оцінити ступінь відмінності між ними.

Основні параметри компараторів зображень наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Основні параметри компараторів зображень

№	НАЗВА ПАРАМЕТРА	ОДИНИЦІ ВИМІРЮВАННЯ	ПОЗНАЧЕННЯ
Вхідні параметри			
1)	Діапазон оптичних потужностей пікселів порівнюваних зображень	Вт/піксел	ΔP_{in}
2)	Вид порівнюваних оптичних сигналів	Когерентні Некогерентні монохроматичні	
3)	Довжина хвилі (спектральний діапазон) порівнюваних зображень	мкм	λ_{in}
Вихідні параметри			
4)	Оптична потужність (діапазон оптичної потужності) вихідного зображення	Вт (Вт/піксел)	P_{out}
5)	Довжина хвилі (спектральний діапазон) вихідного зображення	мкм	λ_{out}
Загальні параметри			
6)	Час відгуку	с	τ_r
7)	Енергія перемикання	Дж/піксел	E_{sw}
8)	Напруга живлення	В	U_n
9)	Споживана потужність (питома споживана потужність)	Вт (Вт/піксел)	$P_{спож}$ $P_{пит\ спож}$
10)	Чутливість (мінімальна різниця оптичних потужностей (або енергій) пікселів, помітних компаратором)	Вт/піксел (Дж/піксел)	ΔP_{in}

Пристрої визначення ступеня збігу зображень призначені для використання в оптоелектронних кореляторах і системах розпізнавання зображень. Вони, як компаратори і пристрої порівняння-віднімання зображень, мають два оптичні картинні входи, але вихід у них – елек-

тричний (одинарний), на якому видається аналоговий сигнал, пропорційний ступеню збігу двох зображень, в якості якого може використовуватися одна з таких величин:

- 1) функція взаємної кореляції двох зображень;
- 2) скалярний добуток двох зображень;
- 3) Евклідова відстань в багатовимірному просторі пікселів двох зображень;
- 4) Манхеттенська відстань в багатовимірному просторі пікселів двох зображень та інші.

1.2 Галузі обчислювальної техніки, де необхідні пристрої порівняння зображень

Багаторічні дослідження з паралельної обробки інформаційних полів (зокрема зображень) викликані нагальними потребами науки і техніки. Необхідність швидкої обробки великих обсягів інформації виникає при вивченні природних ресурсів з аерокосмічних знімків, розпізнаванні образів в медицині, біології, астрофізиці, ядерній фізиці і інших галузях науки і техніки, при обробці багатоканальних електричних сигналів, що отримуються за допомогою сейсмічних, акустичних і радіоприймальних станцій, в системах технічного зору і т.д.

Серед основних сфер застосування операції порівняння зображень можна назвати:

- 1) оптоелектронні паралельні аналогові і цифрові процесори;
- 2) оптоелектронні корелятори систем розпізнавання образів;
- 3) оптоелектронні реалізації штучних нейронних мереж.

Розглянемо детальніше принципи застосування і вимоги до пристроїв для порівняння зображень, які висуваються в перерахованих областях.

1.2.1 Пристрої порівняння зображень в паралельних оптоелектронних аналогових і цифрових процесорах

Можна виділити три основні типи обчислювальних систем обробки зображень (ОСОЗ):

- 1) ОСОЗ на основі універсальних цифрових ЕОМ;
- 2) ОСОЗ на основі аналогових оптичних процесорів;
- 3) ОСОЗ на основі цифрових оптоелектронних процесорів.

У ОСОЗ на основі універсальних ЦЕОМ досягається висока точність і функціональна гнучкість, але недоліком є низька продуктивність, викликана послідовним характером введення (сканування), обробки і виведення зображень.

ОСОЗ на основі аналогових оптичних процесорів [25, 26, 39] характеризуються високою продуктивністю (до 10^{12} оп/с), проте мають обмежену точність обчислень (близько 1 %) і використовуються для вирішення вузького класу завдань (узгоджена фільтрація, перетворення Фур'є, кореляція, згортка та ін.), тобто не є функціонально гнучкими.

Останнім часом особливо інтенсивно ведуться дослідження зі створення ОСОЗ на основі паралельних цифрових оптоелектронних процесорів (ЦОЕП) [13-17, 25, 26, 40-45], які об'єднують в собі переваги ОСОЗ на основі ЦЕОМ і на основі аналогових оптичних процесорів, тобто є високопродуктивними, точними і функціонально гнучкими. Операндами в ЦОЕП є бінарні картини (двохградаційні зображення), над якими виконуються різні логічні, арифметичні і спеціальні операції паралельної обробки зображень за заданою програмою. Майже всі описані в літературі структури паралельних ОСОЗ на основі ЦОЕП включають постійні і оперативні оптичні запам'ятовуючі пристрої (ПЗП і ОЗП), пристрої логічної обробки картин, арифметичні пристрої, перемножувачі матриць та ін. [13-17, 40-45]. Крім того, у багатьох роботах [13-17, 25, 26, 40-45] обґрунтована і необхідність пристроїв для порівняння зображень, які призначені для порівняння як бінарних, так і напівтонових зображень.

Як приклад розглянемо структуру паралельної ОСОЗ на основі ЦОЕП [15, 17, 46], показану на рис. 1.2, до складу якої входять пристрої введення (ПВВ₁-ПВВ_n) з паралельними оптичними входом-виходом, призначені для введення багатоградаційних зображень шляхом перетворення в набір бінарних розрядних зрізів, картинні ПЗП і ОЗП з картинними виходами і, зокрема, стековою організацією, блок D-тригерів картинного типу (БД КТ), призначений для запису,

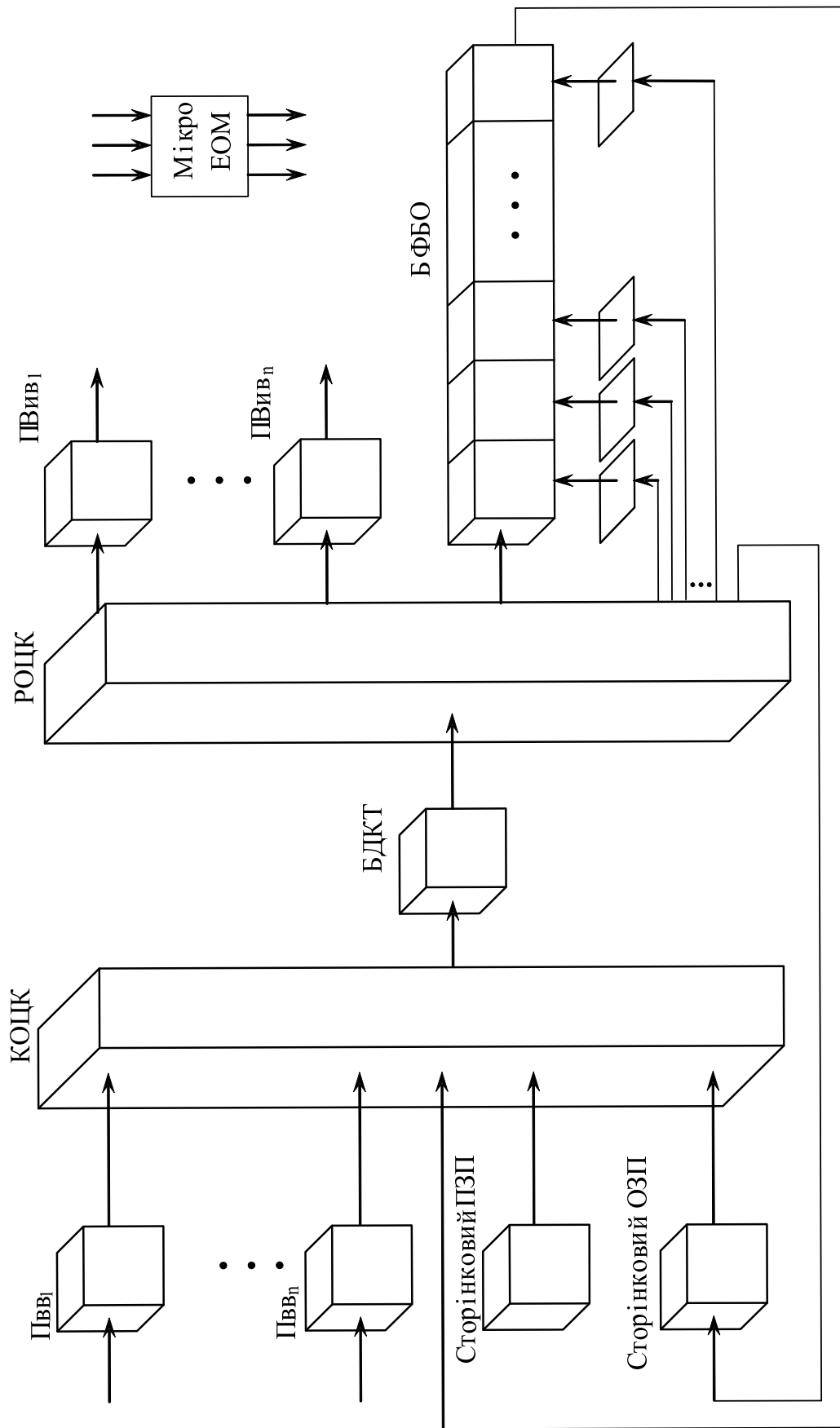


Рис. 1.2. Структура ОСОЗ на основі ЦОЕП

зберігання і зчитування однієї або декількох оптичних цифрових картин, пристрої картинного виведення (ПВив₁-ПВив_n), призначені для відображення результуючої цифрової інформації у вигляді багатоградацийних зображень, комутатор і розгалужувач оптичних цифрових картин (КОЦК і РОЦК), а також багатофункціональний багатоканальний блок обробки (БФБО) з оптичними тригерами картинного типу для запам'ятовування настроювальних керувальних операторів, що відображають алгоритм виконання обраного виду операції. Для загального управління можливе використання мікро-ЕОМ. До складу БФБО можуть входити картинний логічний пристрій, оптоелектронний двовимірний регістр зсуву, перемножувач матриць, цифровий суматор, а також інші спеціалізовані функціональні вузли, склад яких може легко нарощуватися і визначається необхідними елементарними операціями, за якими розкладаються завдання обробки зображень, що вирішуються цим ЦОЕП.

У науково-технічній літературі достатньо широко висвітлені питання побудови таких складових частин ОСОЗ на основі ЦОЕП як логічні пристрої картинного типу [39, 41, 43, 46-49], матричні перемножувачі [15, 17, 50, 51], оптичні сторінкові ЗУ [25, 52, 53], картинні АЦП [21-24] зображень та ін. Проте, практично не розглядаються питання побудови пристроїв для порівняння зображень, хоча на їх необхідність вказується в багатьох роботах [13-38]. Так, в роботах [21-24] вказується, що пристрої для порівняння зображень необхідні при побудові картинних АЦП зображень, а в роботах [13-20] – при побудові лінійно-алгебраїчних процесорів і процесорів сортування.

1.2.2 Пристрої порівняння зображень в кореляційних системах розпізнавання образів

У сучасних системах технічного зору широко використовуються зображення як основні джерела інформації. У вирішенні завдань виявлення і розпізнавання об'єкта на складному фоні найбільше застосування знайшов кореляційний алгоритм, який в даний час має найпростішу реалізацію. Розпізнавання об'єктів кореляційними ТБ-системами проводиться на основі порівняння відеосигналів від

двох зображень одного і того ж сюжету: еталонного зображення об'єкта, отриманого заздалегідь, і поточного зображення порівнюваного об'єкта.

Основним функціональним елементом кореляційної ТБ-системи є корелятор, що обчислює значення взаємної кореляційної функції між відеосигналами еталонного і поточного зображень. У використовуваних в даний час СТЗ кореляційний алгоритм розпізнавання реалізується як електронними (цифровими) пристроями, так і за допомогою когерентних оптичних кореляторів.

Основний недолік електронних кореляторів полягає в сильній залежності часу обчислення кореляційної функції від розмірів (числа пікселів) розпізнаваного і вхідного зображень, що ускладнює реалізацію розпізнавання в реальному масштабі часу у разі складних інформативних зображень.

У оптичних (голографічних) кореляторах час обробки (розпізнавання) мало залежить від складності і розмірності розпізнаваних зображень (за рахунок паралельності обробки) і визначається часом введення і виведення зображень в корелятор. Проте це достатньо складні і дорогі пристрої.

Прийнятнішим рішенням є використання корелятора на основі пристрою для порівняння зображень. Головною особливістю такого корелятора [27] є паралельний розрахунок двовимірної функції взаємної кореляції аналізованих зображень безпосередньо в напівпровідниковому світлокеруваному фотодетекторі (СФД) спеціального типу. У ньому за допомогою світлового потоку можна довільно змінювати розмір і конфігурацію його фоточутливої поверхні. Такий СФД можна використовувати для створення нового типу оптоелектронного корелятора, призначеного для розпізнавання оптичних зображень. Для цього на управляючу поверхню СФД проектується еталонне зображення розпізнаваного об'єкта, а на протилежну поверхню – поточне зображення, а потім здійснюється взаємний зсув цих зображень по обох координатах і їх узгодження за масштабом і кутовою орієнтацією. Під дією еталонного зображення відповідні області протилежної поверхні напівпровідникової структури стають фоточутливими. При цьому сигнал на виході СФД визначатиметься інтегралом перекриття

цих зображень, тобто буде пропорційним функції взаємної кореляції (ФВК) еталонного і вхідного зображень. За умови збігу еталонного зображення об'єкта і його поточного зображення за розміром і кутовою орієнтацією значення ФВК досягає максимуму. За цим значенням і ухвалюється рішення про наявність розпізнаваного об'єкта у полі зору системи. Час обчислення інтеграла в цьому кореляторі визначається швидкодією СФД, а сам процес обчислення реалізується за один такт незалежно від розмірності (інформативності) зображень. Таким чином, швидкодія цього оптоелектронного корелятора зображення (ОЕКЗ) обмежуватиметься часом введення зображень на поверхню СФД, а не часом обчислення кореляційного інтеграла. В результаті корелятор працюватиме в темпі надходження зображень на поверхню СФД, тобто в реальному часі. Процедури взаємного зсуву еталонного і розпізнаваного зображень, їх масштабування і повороту передбачається реалізувати відомими електронними методами, що використовуються в телевізійних і оптичних кореляторах зображень.

Електричний сигнал на виході СФД прямо пропорційний двовимірній функції взаємної кореляції зображення досліджуваного об'єкта і зображення еталонного об'єкта. При повному збіганні досліджуваного зображення з еталонним за положенням, розмірами і кутовою орієнтацією електричний сигнал на виході СФД виявиться максимальним. У цьому кореляторі замість СФД може бути використаний пристрій для порівняння зображень з приєднаними до його виходу просторово інтегруючою лінзою і фотодетектором. В цьому випадку електричний сигнал на виході фотодетектора буде зворотно пропорційний двовимірній функції взаємної кореляції зображення досліджуваного об'єкта і зображення еталонного об'єкта і виявиться мінімальним при збіганні цих зображень.

Такий оптоелектронний корелятор об'єднує переваги оптичного корелятора (паралельність обробки і незалежність часу розпізнавання від складності і розмірності розпізнаваних зображень) і електронного корелятора (гнучкість і універсальність) і володіє такими позитивними якостями:

- 1) простота і наочність обчислення функції взаємної кореляції (ФВК) двох зображень;

- 2) є універсальним пристроєм, призначеним для розпізнавання зображень будь-яких об'єктів;
- 3) дозволяє безпосередньо розпізнавати високоінформативні зображення об'єктів незалежно від їх складності;
- 4) проводить розпізнавання об'єктів шляхом паралельної обробки сигналів зображення в реальному часі, незалежно від їх складності;
- 5) дозволяє проводити розпізнавання зображень об'єктів в некогерентному світлі;
- 6) може бути виготовлений з великою апертурою (більше 10 см) ;
- 7) має просторову роздільну здатність 5...10 пар ліній/мм;
- 8) дозволяє ідентифікувати високоінформативні зображення будь-яких об'єктів з граничною для сучасного рівня техніки надійністю (по числу точок телевізійного кадру) без попередньої обробки зображень за спеціальними програмами;
- 9) володіє універсальністю і простотою зміни еталонних зображень;
- 10) має малі габарити, енергоспоживання і вартість.

Такі корелятори можуть бути використані для розпізнавання складних високоінформативних зображень в інтелектуальних системах технічного зору різного призначення:

- автоматизована збірка на конвеєрі;
- розпізнавання облич з екрану монітора в реальному часі – розпізнавання відбитків пальців в криміналістиці;
- розпізнавання кредитних карт за фотокарткою власника;
- розпізнавання ракових клітин в медицині;
- запобігання несанкціонованому доступу в спеціальні приміщення;
- використання в сучасних телевізійних, радіолокаційних, тепловізійних та інших системах – навігація і астронавігація літальних апаратів за наземними орієнтирами, зірками тощо.

1.2.3 Пристрої для порівняння зображень в оптоелектронних реалізаціях штучних нейронних мереж

Пристрої для порівняння зображень необхідні практично у всіх відомих архітектурах нейронних мереж. Пояснюється це тим, що формальний нейрон у разі оптичного виду його сигналів може бути представлений коміркою компаратора зображень (рис. 1.3).

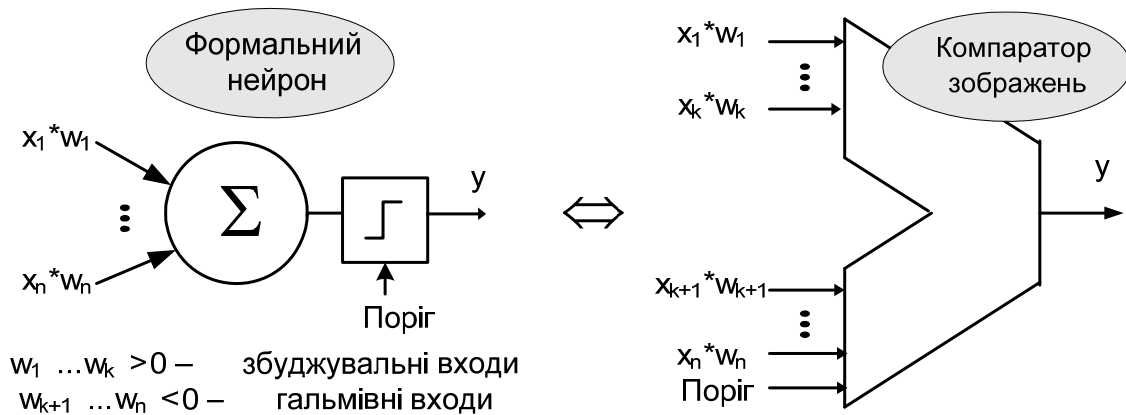


Рис. 1.3. Представлення формального нейрона коміркою компаратора зображень при оптичній природі сигналів нейронної мережі

Серед всіх відомих парадигм нейронних мереж пристрої порівняння зображень в явному вигляді необхідні в таких нейронних мережах:

- 1) Кохонена;
- 2) зустрічного поширення;
- 3) на основі теорії адаптивного резонансу (ART-мережі).

Розглянемо детальніше призначення пристроїв порівняння зображень у вказаних нейронних мережах.

Мережа Кохонена (Kohonen's neural network), або як її ще називають – карта ознак Кохонена, що самоорганізовується (Kohonen's self organizing feature map), була запропонована Кохоненом в 1984 році. До теперішнього часу існує безліч модифікацій початкової моделі з багатою математичною теорією навколо них.

Алгоритм Кохонена дає можливість будувати нейронну мережу для розділення векторів вхідних сигналів на підгрупи. Мережа складається з M нейронів, що створюють прямокутні ґрати на площині

(рис. 1.4). Елементи вхідних сигналів подаються на входи всіх нейронів мережі. В процесі роботи алгоритму настраюються синаптичні ваги нейронів.

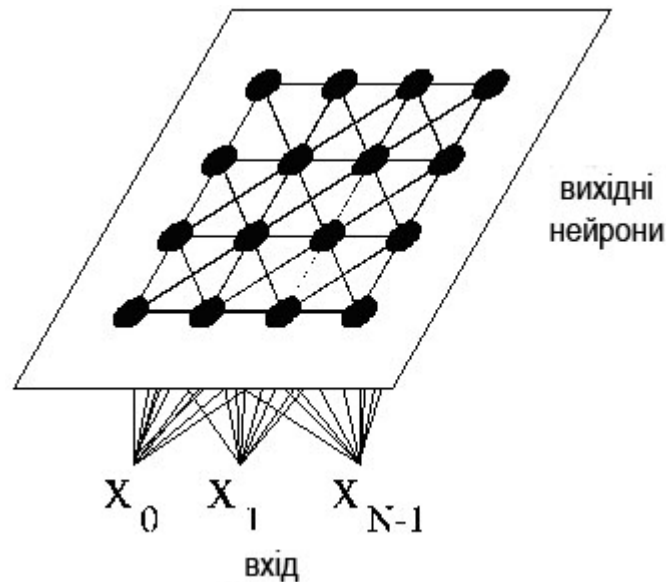


Рис. 1.4. Мережа Кохонена

Вхідні сигнали – вектори дійсних чисел – послідовно надходять в мережу. Бажані вихідні сигнали не визначаються. Після того, як було подано достатнє число вхідних векторів, синаптичні ваги мережі визначають кластери. Крім того, ваги організуються так, що топологічно близькі вузли є чутливими до схожих зовнішніх впливів (вхідних сигналів).

Для реалізації алгоритму необхідно визначити міру сусідства нейронів (міру близькості). Зони топологічного сусідства нейронів – це безліч нейронів, які вважаються за сусідів нейрона j у момент часу t . Зони сусідства зменшуються з часом.

Алгоритм Кохонена формування карт ознак:

Крок 1. Ініціалізація мережі:

Ваговим коефіцієнтам мережі присвоюються малі випадкові значення. Загальне число синаптичних ваг – $M \times N$ (див. рис. 1.4).

Крок 2. Надходження в мережу нового вхідного сигналу.

Крок 3. Обчислення відстані до всіх нейронів мережі:

Відстані d_j від вхідного сигналу до кожного нейрона j визначається за формулою

$$d_j = \sum_{i=0}^{N-1} (x_i(t) - w_{ij}(t))^2, \quad (1.3)$$

де x_i – i -й елемент вхідного сигналу у момент часу t ; $w_{ij}(t)$ – вага зв'язку від i -го елемента вхідного сигналу до нейрона j у момент часу t .

Крок 4. Вибір нейрона з найменшою відстанню:

Вибирається нейрон j^* , для якого відстань d_j найменша.

Крок 5. Налаштування ваг нейрона j^* і його сусідів:

Проводиться підстроювання ваг для нейрона j^* і всіх нейронів з його зони сусідства. Нові значення ваг

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + r(t)(x_i(t) - w_{ij}(t)), \quad (1.4)$$

де $r(t)$ – крок навчання, що зменшується з часом (позитивне число, менше одиниці).

Крок 6. Повернення до кроку 2.

Сфери застосування: кластерний аналіз, розпізнавання образів, класифікація.

Одна з модифікацій полягає в тому, що до мережі Кохонена додається мережа MAXNET, яка визначає нейрон із найменшою відстанню до вхідного сигналу.

Архітектура **зустрічного поширення** (counter propagation) вдало об'єднує в собі переваги можливості узагальнення інформації мережі Кохонена і простоту навчання вихідної зірки Гроссберга. Творець мережі зустрічного поширення Р. Хехт-Нільсен (R. Hecht-Nielsen, 1987) рекомендує використання цієї архітектури для швидкого моделювання систем на початкових етапах досліджень з подальшим переходом, якщо це буде потрібно, на значно дорожчий, але точніший метод навчання із зворотним розповсюдженням помилок.

Нейронна мережа зустрічного поширення (ЗП) навчається на вибірці пар векторів (\mathbf{X}, \mathbf{Y}) α завдання представлення відображення $\mathbf{X} \rightarrow \mathbf{Y}$. Особливістю цієї мережі є здатність до навчання та відображення сукупності \mathbf{XY} в себе. При цьому, завдяки узагальненню з'являється можливість відновлення пари (\mathbf{XY}) за одною відомою компонентою (\mathbf{X} або \mathbf{Y}). При пред'явленні на етапі розпізнавання тільки вектора \mathbf{X} (з нульовим початковим \mathbf{Y}) проводиться пряме відображення – відновлюється \mathbf{Y} , і навпаки, при відомому \mathbf{Y} може бути

ЛІТЕРАТУРА

1. Колесницкий О. К. Области применения операции параллельного сравнения изображений и устройства для ее осуществления (Обзор) / О. К. Колесницкий, В. П. Кожемяко, Сами Важих Хейреддин // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2006. – № 2 (12). – С. 119–128.
2. Колесницкий О. К. Устройства сравнения изображений на биспин-приборах / О. К. Колесницкий, Сами Важих Хейреддин, М. В. Крещенецкая // Информационные технологии в научных исследованиях и учебном процессе (Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета : Спецвыпуск). – Алчевск, Луганск, 2006. – С. 60–67.
3. Методы и оптоэлектронные средства визуализации звуковых образов и некоторые подходы к их распознаванию оптическими изображениями / [О. Г. Натрошвили, К. Н. Камкамидзе, Т. О. Бегианидзе, Сами Важих Хейреддин] // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2002. – № 2 (4). – С. 92–96.
4. Колесницкий О. К. Устройства сравнения изображений на биспин-приборах / О. К. Колесницкий, Сами Важих Хейреддин, М. В. Крещенецкая // Інформаційні технології в наукових дослідженнях і навчальному процесі : II міжнар. наук.–практ. конф. Луганськ, 14–16 листоп. 2006 р. – Луганськ : «Альма-матер», 2006. – Том 1. – С. 158–160.
5. Колесницкий О. К. Устройство сравнения изображений для систем распознавания образов / О. К. Колесницкий, Сами Важих Хейреддин // Інтелектуальні системи прийняття рішень та прикладні аспекти інформаційних технологій (ISDMIT'2006) : міжнародна наукова конференція. Євпаторія, 15—18 травня 2006 р. – Херсон : Видавництво Херсонського морського інституту, 2006. – Том 1. – С. 108–110.
6. Перспективи реалізації оптоелектронних індикаторних пристроїв / [Т. Б. Мартинюк, М. О. Юрченко, О. М. Наконечний, Хейреддин Самі Важих] // Сучасні наукові дослідження-2006 : II міжнародна науково-практична конференція. Дніпропетровськ, 20—28 лютого 2006 р. – Дніпропетровськ : «Наука і освіта», 2006. – Том 46. – С. 16–18.
7. Кожем'яко В. П. Аналіз і екстраполяція траєкторії об'єкта в системах оптичної локації / В. П. Кожем'яко, А. Т. Теренчук, Самі Важих Хейред-

дін // Перша науково-технічна конференція Харківського університету повітряних сил : (тези доповіді). Харків, 16–17 лютого 2005 р. – Харків, 2005. – С. 22–23.

8. Геометричні характеристики випромінювання напівпровідникових освітлювачів для систем технічного зору / [А. Т. Теренчук, В. П. Кожем'яко, Ю. П. Гульчак, Самі Важіх Хейреддін] // Optoelectronic Information Technologies “PHOTONICS–ODS–2005 : III міжнародна конференція. Вінниця, 27–28 квітня 2005 р. – Вінниця : КІВЦ ВНТУ, 2005. – С. 61–63.

9. Теренчук А. Т. Побудова та застосування світлодіодних освітлювальних пристроїв на основі принципу просторово-часового керування / А. Т. Теренчук, В. П. Кожем'яко, Самі Важіх Хейреддін // Світлотехніка й електроніка: історія, проблеми й перспективи : II міжнародна науково-технічна конференція. Тернопіль, 24–27 травня 2005 р. – Тернопіль : Видавництво Тернопільського державного технічного університету, 2005. – С. 42–43.

10. Пат. Укр. №12866, МПК G06 K9/00. Спосіб повороту зображення на екрані матричного індикатора на заданий кут / Кожем'яко В. П., Тимченко Л. І., Маліночка О. В., Хейреддін Самі Важіх ; Заявл. 18.05.2005 ; Опубл. 15.03.2006 ; Бюл. № 3 – 12 с.

11. Approach for real-time image recognition / [V. P. Kozhemyako, L. I. Tymchenko, Yu. F. Kutaev, A. A. Yaroviyy] // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2001. – № 1. – С. 110–124.

12. Method for Training of a Parallel-Hierarchical Network, Based on Population Coding for Processing of Extended Laser Paths Images / [L. I. Timchenko, Yu. F. Kutaev, V. P. Kozhemyako et al] // Proceedings of SPIE. – 2002. – Vol. 4790. – P. 465–479.

13. Заболотна Н. І. Паралельний ітераційний спец-процесор для розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь / Н. І. Заболотна, В. В. Шолота, С. В. Костюк // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2004. – № 1. – С.138–143.

14. Методи паралельного обчислення потрійного добутку матриць на основі прийомів оптичних цифрових обчислень / [Н. І. Заболотна, В. В. Шолота, С. В. Костюк, О. В. Дроненко] // Вимірювальна та обчислю-

вальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький. – 2004. – № 2. – С. 78–81.

15. Заболотная Наталия Ивановна. Организация вычислительных структур высокопроизводительных линейно-алгебраических процессоров параллельной обработки матриц : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.05 / Заболотная Наталия Ивановна. – Винница, 1996. – 214 с.

16. Параллельная обработка изображений : Препринт / [В. П. Кожемяко, А. К. Гара, Т. Б. Мартынюк, А. Г. Буда] / Ужгородский государственный университет. – Ужгород, 1993/ – С. 83.

17. Кожемяко В. П. Системный анализ параллельных оптоэлектронных процессоров : Препринт / В. П. Кожемяко, Т. Б. Мартынюк, Н. И. Заболотная. – Львов, 1992.

18. Организация ассоциативной обработки информации с нетрадиционным кодированием / [Т. Б. Мартынюк, М. М. Аль-Хияри, Е. Н. Мартынович, А. Н. Гринчук] // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький. – 1999. – № 3. – С. 114–118.

19. Мартынюк Татьяна Борисовна. Организация ассоциативного процессора с поразрядно-последовательной обработкой информации / Т. Б. Мартынюк // Электронное моделирование. – 1996. – № 3. – С. 28–31.

20. Martyniuk Tetiana B. Structure of associative processor with bitwise serial processing of data / Tetiana B. Martyniuk // Engineering simulation. – 1997. – № 14. – P. 383–389.

21. Колесницкий Олег Константинович. Оптоэлектронные аналого-цифровые картинные преобразователи для параллельных информационно-измерительных систем обработки изображений : дис. ... канд. техн. наук: 05.11.16 / Колесницкий Олег Константинович. – Винница, 1994. – 220 с. – Бібліогр. : с. 192–205.

22. А. с. № 1674051 Аналого-цифровой преобразователь изображений / Ковтонюк Н. Ф, Колесницкий О. К. и др. – Опубл. в БИ № 32, 1991.

23. А. с. № 1803902 Аналого-цифровой преобразователь изображений / Кожемяко В. П. и др. – Опубл. в БИ № 11, 1993.

24. А. с. № 1753447 Аналого-цифровой преобразователь изображений / Кожемяко В. П., Колесницкий О. К. и др. – Опубл. в БИ № 29, 1992.

25. Акаев А. А. Оптические методы обработки информации / А. А. Акаев, С. А. Майоров. — М. : Высшая школа, 1988. — 214 с. — ISBN 5-7577-0188-9.
26. Оптическая обработка информации, применения / [Под ред. Д. Касасента : Пер. с англ.] — М. : Мир, 1980. — 330 с. — ISBN 0460-0509.
27. Пат. РФ № 2212054. Оптический коррелятор / Кашерининов П. Г.; Лодыгин А. Н.; Соколов В. К., опубл. 09.10.2003.
28. Круг П. Г. Нейронные сети и нейрокомпьютеры : Учебное пособие по курсу «Микропроцессоры» / П. Г. Круг. — М. : Издательство МЭИ, 2002. — 176 с. ISBN 5-7046-0832-9
29. Галушкин А. И. Нейрокомпьютеры. Кн. 3 : Учебное пособие для вузов / [Общая редакция А. И. Галушкина]. — М. : ИПРЖР, 2000. — 528 с. — ISBN 5-93108-007-4.
30. W. Maass and C. M. Bishop, editors, Pulsed Neural Networks, MIT Press, Cambridge, 1999.
31. Круглов В. В. Искусственные нейронные сети: Теория и практика / В. В. Круглов, В. В. Борисов. — 2-е изд., стереотип. — М. : Горячая линия—Телеком, 2002.
32. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника / Ф. Уоссермен. — М. : Мир, 1992.
33. S. Haykin, Neural Networks: A Comprehensive Foundation, MacMillan College Publishing Co., New York, 1994.
34. Нейрокомпьютеры и их применение // Тематический выпуск «Зарубежная радиоэлектроника». — № 2, 1997. — 80 с.
35. Степанов М. В. Оптические нейрокомпьютеры / М. В. Степанов // Нейрокомпьютер, 1992. — № 1.
36. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / Г. К. Вороновский, К. В. Махотило, С. Н. Петрашев, С. А. Сергеев. — Харьков : ОСНОВА, 1997. — 112 с.
37. Горбань А. Н. Нейронные сети на персональном компьютере / А. Н. Горбань, Д. А. Россиев. — Новосибирск : Наука, 1996.
38. J. J. Hopfield, «Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities», in Proc. National Academy of Sciences, USA 79, 1982, P. 2554–2558.

39. Применение методов Фурье-оптики / Под ред. Г. Старка ; Пер с англ. под ред. И. Н. Компанца. – М. : Радио и связь, 1988. – 536 с.
40. Акаев А. А. Оптоэлектронная цифровая вычислительная система в остаточной арифметике для обработки изображений / А. А. Акаев, С. З. Дордоев // Автометрия, 1989, № 3, С. 48–63.
41. Денисов В. М. Структура цифрового оптоэлектронного процессора многоуровневых изображений по пространственно-непрерывным разрядным срезам / В. М. Денисов, Ю. Н. Матвеев, Е. Ф. Очин // Электронное моделирование, 1984, № 6, С. 99–101.
42. Квазиимпульсно-потенциальные оптоэлектронные элементы и устройства логико-временного типа / Свечников С. В., Кожемяко В. П. Тимченко Л. И. – К. : Наук. думка, 1987. – 256 с.
43. Морозов В. Н. Оптоэлектронные матричные процессоры. – М.: Радио и связь, 1986. – 112 с.
44. Хуан А. Об архитектуре оптической цифровой вычислительной машины / А. Хуан // ТИИЭР, 1984, т. 72, № 7, с. 34–42.
45. Shucke G. Parallel architecture for a digital optical computer/ G. Shucke // Appl. Opt. — 1989. – Vol. 28, No 2/ — P. 363.
46. Дубчак Виктор Николаевич. Математическое моделирование операций параллельной обработки изображений в оптоэлектронных структурах с программируемой настройкой : дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05 / Дубчак Виктор Николаевич. – Винница, 1992. – 225 с.
47. Итиока Е. Оптические параллельные логические вентили на основе теневой системы для оптических цифровых вычислений / Е. Итиока, Дж. Танида // ТИИЭР. – 1984. – Т. 72. – № 7. – С. 42–58.
48. Федоров В. Б. Оптические логические элементы для высокопроизводительных оптических процессоров / В.Б. Федоров // Квантовая электроника. – 1990. – Т. 17. – № 12. – С. 1539–1545.
49. Фишер Р. Нелинейные оптические устройства – основанные элементы будущих цифровых оптических компьютеров / Р. Фишер, Р. Мюллер // Квантовая электроника. – 1989. – Т. 16. – № 8. – С. 1723–1730.
50. Динамические оптические системы соединений для параллельных процессоров // Радиоэлектроника за рубежом (Обзоры), вып. 8 (40) – М. : НИИЭИР. – 1989. – С. 1–27.

51. Кулаков С. В. Акустооптические цифровые процессоры для операций матричной алгебры / С. В. Кулаков и др. // Зарубеж. радиоэлектроника. – 1988. – № 12. – С. 30–40.
52. Ванюшев В. В. Архитектура информационной системы на основе голографической памяти большой емкости / В. В. Ванюшев и др. // Автометрия. – 1989. – С. 74–82.
53. Оптическая голография / Под ред. Г. Колфилда : пер. с англ. – М. : Мир, 1982. – Т. 1. – 376 с., Т. 2 – 360 с.
54. Пространственные модуляторы света / [А. А. Васильев, Д. Касасент, И. Н. Компанец, А. В. Парфенов]. – М. : Радио и связь, 1987. – 320 с.
55. Стемпковский А. КМОП-фотодиодные СБИС – перспективная элементная база однокристалльных систем приема и обработки информации / А. Стемпковский, В. Шилин // ЭЛЕКТРОНИКА: наука, технология, бизнес. – 2003. – № 2. – С. 14–20.
56. Cassinelli A. Dedicated Optoelectronic Stochastic Parallel Processor (OSPP) for real-time image processing: motion detection demonstration and design of a hybrid CMOS/SEED based prototype / A. Cassinelli, P. Chavel and M. Desmulliez // Applied Optics, Vol. 40, No. 35, P.6479–6491, December (2001).
57. Buczynski R. Fast optical thresholding with an array of optical thyristor differential pairs / [R. Buczynski, R. Ortega, T. Szoplika, et al.] // JEOS Special Issue on Optics in Computing, Vol. 1, P. 1–279, March 1999.
58. Doo-Gun Kim Optical characteristics of PnpN optical thyristor operating at 1.55 mm / [Doo-Gun Kim, Hee-Hyun Lee et al.] // Opt. Eng. 42(4), 1093–1099 (April 2003).
59. Lentine A.L. A 2 kbit Array of Symmetric Self-Electrooptic Effect Devices / A. L. Lentine [et al.] // IEEE Phot. Tech. Lett., Vol. 2, P. 51–53 (1990).
60. Дордоев С. З. Оптическая цифровая вычислительная техника / С. З. Дордоев // Зарубежная радиоэлектроника. – 1989. – № 10. – С. 16–21.
61. Эйбрэхэм А., Ситон К. Т., Смит С. Д. / В мире науки. – 1983. – № 4.
62. <http://optics.org/articles/news/12/5/29/1>
63. Васильев А. А. Оптический операционный усилитель для обработки изображения / А. А. Васильев и др. // II Всесоюзная конференция по оптической обработке информации : Тез. докл. – Фрунзе: Илим., 1990. – С. 69–70.

64. Кнаб О. Д. Биспин – новый тип полупроводниковых приборов / О. Д. Кнаб // Электронная промышленность. – 1989. – № 8. – С. 8–14.

65. Булгаков С. С. Токовая неустойчивость в транзисторных биспин-структурах / С. С. Булгаков и др. // Электронная промышленность. – 1990. – № 8. – С. 15–20.

66. Булгаков С. С. Биспин — новый прибор микроэлектроники / С. С. Булгаков, О. Д. Кнаб, А. П. Лысенко, Ю. А. Мома // Обзоры по электронной технике. Серия 2 : Полупроводниковые приборы. Выпуск 6 (1563). – М. : ЦНИИ «Электроника», 1990.

67. Лысенко А. П. Полупроводниковые приборы на основе явлений токовой неустойчивости в *p-n*-переходах и омических контактах малого размера : автореф. дис. на соискание учен. степени доктора техн. наук : спец. 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника на квантовых эффектах» / А. П. Лысенко. – Москва, 2001. – 396 с. – Библиогр. : с. 379–396.

68. Лысенко А. П. Два режима пульсаций преобразовательного элемента на БИСПИН-приборе / А. П. Лысенко // Микроэлектроника. – 1999. – Т. 28. – № 2. – С. 148–154.

69. Лысенко А. П. Механизм возникновения пульсаций тока в БИСПИН-преобразовательном элементе нового типа / А. П. Лысенко // Измерительная техника. – 1998. – № 9. – С. 28–31.

70. Лысенко А. П. Стационарно запертое состояние БИСПИН-прибора — нового элемента АЦП для оптоэлектроники / А. П. Лысенко // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 1999. – № 3. – С. 35–40.

71. Лысенко А. П. Диаграмма состояний БИСПИН-прибора – нового элемента АЦП для оптоэлектроники / А. П. Лысенко // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 1999. – № 4. – С. 16–20.

72. А. с. 1746389 СССР, МПК G 06 E 3/00 Оптоэлектронный узел матрицы для сравнения изображений / В. П. Кожемяко и др. – № заявки 4819781/24; заявл. 12.02.90; опубл. 07.07.92, Бюл. № 25.

73. Пат. 2993 Україна, МПК G 06 C 9/00. Оптоелектронний вузол матриці для порівняння зображень / В. П. Кожем'яко та ін. – № заявки 93300913; заявл. 25.03.93; опубл. 26.12.94, Бюл. № 5–1.

74. Мартинюк Т. Б. Аналіз та оптимізація складних систем : Навчальний посібник / Т. Б. Мартинюк, В. П. Кожем'яко. – Вінниця: ВДТУ, 1998. – 79 с.
75. Электронные приборы : учебник для вузов / [В. Н. Дулин, Н. А. Аваев, В. П. Демин и др.]; под ред. Г. Г. Шишкина. – [4-е изд., перераб. и доп.] – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 496 с.
76. Мандель И. Д. Кластерный анализ / И. Д. Мандель. – М. : Финансы и статистика, 1988. – 176 с.
77. Гильберт А. Как работать с матрицами / А. Гильберт. – [Пер. с нем.] – М. : Статистика, 1981. – 157с.
78. Клиот-Дашинский М. И. Алгебра матриц и векторов / М. И. Клиот-Дашинский – Л. : Изд-во Ленинградского ун-та, 1974. – 160 с.
79. Болч Б. Многомерные статистические методы для экономики / Б. Болч, К. Дж. Хуань; [пер. с англ.] – М. : Статистика, 1979. – 317 с.
80. Стренг Г. Линейная алгебра и ее применения / Г. Стренг; [пер. с англ.] – М. : Мир, 1980. – 454 с.
81. Леонов В. П. Обработка экспериментальных данных на программируемых микрокалькуляторах / В. П. Леонов; [под ред. Б. А. Гладких]. – Томск: ТГУ, 1990. – 376 с.
82. Дюк В. А. Информационные технологии в медико-биологических исследованиях / В. А. Дюк. – СПб. : Питер, 2003. – 528 с.
83. Александров В. В. Анализ данных на ЭВМ. (На примере системы СИТО) / В. В. Александров, А. И. Алексеев, Н. Д. Горский. – М.: Финансы и статистика, 1990. – 192 с.
84. Айвазян С. А. Классификация многомерных наблюдений / С. А. Айвазян, З. И. Бежаева, О. В. Староверов – М. : Статистика, 1974. – 240 с.
85. Прикладная статистика : Классификация и снижение размерности / [С. А. Айвазян, В. М. Бухштабер, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин]. – М. : Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
86. Дюран Б. Кластерный анализ / Б. Дюран, П. Оделл. – М. : Статистика, 1977. – 128 с.
87. Классификация и кластер: [под ред. Дж. Вэн Райзина]. – М. : Мир, 1980. – 390 с.

88. Перегудов Ф. И. Основы системного анализа / Ф. И. Перегудов, Ф. П. Тарасенко. – [учеб. 2-е изд., доп.] – Томск : Изд-во НТЛ, 1997. – 396 с.
89. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / [Дж. О. Ким, Ч. У. Мьюллер, У. Р. Клекка и др.] ; пер. с англ., под ред. И. С. Енюкова. – М. : Финансы и статистика, 1989. – 215 с.
90. Браверман Э. М. Структурные методы в обработке эмпирических данных / Э. М. Браверман, И. Б. Мучник. – М. : Наука, 1983.
91. Енюков И. С. Методы, алгоритмы, программы многомерного статистического анализа: пакет ППСА / И. С. Енюков. – М. : Финансы и статистика, 1986. – 232 с.
92. Сильвестров Д. С. Программное обеспечение прикладной статистики : Обзор состояния. Тенденции развития / Д. С. Сильвестров. – М. : Финансы и статистика, 1988. – 240 с.
93. Методы анализа данных : Подход, основанный на методе динамических сгущений / Кол. авт. под рук. Э. Дидэ ; под ред. и с предисл. С. А. Айвазяна и В. М. Бухштабера ; [пер. с фр.]. – М. : Финансы и статистика, 1985. – 357 с.
94. Жамбю М. Иерархический кластер-анализ и соответствия / М. Жамбю; [пер. с фр.]. – М. : Финансы и статистика, 1988. – 342 с.
95. Патрик Э. Основы теории распознавания образов / Э. Патрик; под ред. Б.Р.Левина; [пер с англ.]. – М. : Сов. Радио, 1980. – 408 с.
96. Кузьмин И. В. Основы теории информации и кодирования / И. В. Кузьмин, А. В. Кедрус. – К. : Высшая школа, 1977. – 278 с.
97. Кузьмин И. В. Оценка эффективности автоматических систем контроля и управления / И. В. Кузьмин. – М. : Советское радио, 1971. – 296 с.
98. Филинюк Н. А. Критерий эффективности информационных устройств преобразования и управления / Н. А. Филинюк // Изв. ВУЗов СССР, Приборостроение. – 1984. – № 3. – С. 3.
99. Three-dimensional integrated circuits [Электронный ресурс] / A. W. Topol, D. C. La Tulipe, et al. // Advanced Silicon Technology. – 2006. – Vol. 50, No 4/5. – Режим доступа до журналу : <http://www.research.ibm.com/journal/rd/504/topol.html>

Наукове видання

**Колесницький Олег Костянтинович
Кожем'яко Володимир Прокопович**

**ПРИСТРОЇ ПОРІВНЯННЯ ЗОБРАЖЕНЬ
НА БІСПІН-ПРИЛАДАХ ДЛЯ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ
ПАРАЛЕЛЬНИХ ПРОЦЕСОРІВ
ТА НЕЙРОКОМП'ЮТЕРІВ**

Монографія

Редактор Н. Мазур

Оригінал-макет підготовлено О. Колесницьким

Підписано до друку 6.10.2010 р.
Формат 29,7×42¼ Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 7,16
Наклад 100 прим. Зам № 2010-162

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-81-59
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.